

# 大型水陆两栖飞机低成本数字化装配技术

## Low-Cost Digital Assembly Technology of Large Amphibious Aircraft

中航通飞华南飞机工业有限公司 冯万喜 王 彬 巩玉强

**[摘要]** 就大型水陆两栖飞机的项目背景,在借鉴国内外大型飞机数字化装配技术的基础上,介绍了半自动化柔性装配技术的应用过程和技术要点。对基于全数字化设计背景下,如何实现低成本的数字化装配技术进行了分析和探讨,通过数字化协调、激光跟踪仪辅助测量、数字化虚拟仿真、质量评价等手段实现飞机主要大部件的精确对接。

**关键词:** 柔性装配 工艺接头 数字化测量

**[ABSTRACT]** Introduce the application process and technical essentials of semiautomatic flexible assembly technology according to the project background of the large amphibious aircraft and large aircraft digital assembly technology at home and abroad makes analysis and discussion about how to realize low-cost digital assembly technology based on the total digitalization design background. The major large components accurate connection could be realized through the means of digital coordination, laser tracker aided measurement, digital virtual simulation and quality evaluation.

**Keywords:** Flexible assembly Process fitting Digital measurement

激光测量技术、计算机控制技术、机电一体化技术、计算机网络和集成测量技术的发展,已经将飞机装配技术推动到了一个全新的高度,由计算机参与定位器控制、激光测量系统和控制系统组成的综合对接技术已经成为大飞机部件对接的主要发展方向。对于大型飞机数字化对接技术的研究适应了数字化设计、制造和装配的要求,对于降低工装成本、缩短部件的装配周期,确保产品的精度和质量等方面具有重要的意义。

大型水陆两栖飞机是为满足我国森林灭火和水上救援等任务的需求,为国家航空应急救援体系研制的一款目前世界上最大的水陆两栖飞机,其机长 36.7m,翼展 39m,最大起飞重量超过 50t (如图 1 所示)。两栖飞机的研制采用“主制造商-供应商”模式,即供应商完成主要大部件的装配工作,交付到主承制商后进行异地的大部件对接装配、飞机总装和试飞、交付工作。项目充

分利用现有型号和对外合作项目的成功经验,选择目前成熟的工艺技术方案,降低了技术风险,可有效控制科研和制造成本。全机采用基于模型定义(MBD)的三维数字化设计技术,为数字化装配技术的推广和实施提供了良好的保障基础。

飞机数字化装配作为飞机数字化制造的重要环节,能够保证飞机装配过程中三维数字化样机外形数学模

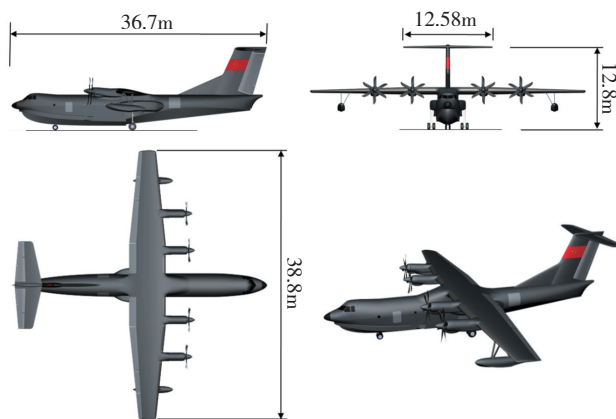


图1 两栖飞机总体图

Fig.1 General graph amphibious aircraft

型的唯一性和一致性,在飞机低成本制造目标控制理念下,对于保证飞机装配精度和质量,降低出错率和装配成本,减少装配工装数量和生产面积,提高飞机制造和装配效率,缩短科研和生产周期都有极其重要的意义<sup>[1]</sup>。

基于飞机广泛采用数字化设计的基础,飞机大部件对接技术可以划分为手动调整对接和自动化对接两种模式。手动调整对接模式主要是采用传统的硬式工装并借助光学测量仪器或者数字化测量设备等进行大部件的对接和测量,如我国自主研制的 ARJ21 飞机便是采用此种方式(如图 2 所示);自动化对接技术则是采用自动定位系统,使用数字化测量设备等进行大部件的精确测量对接,该技术目前主要用于预期产量较大的新研制型号上,如波音 787、空客 A400M 等在大部件对接工作中主要采用自动化和数字化对接技术,在对接精度及对接效率方面相对于传统对接技术有了质的飞跃,加工装配愈发精密,差错率明显降低,工装工具数量大幅减



图2 ARJ21手动定位工装  
Fig.2 ARJ21 manual locating tooling

少,大量减少操作工人的干预度,大大提高了飞机装配质量。

然而自动化对接系统价格昂贵,一般为数千万甚至上亿元,是所有飞机总装生产线中所需费用最大的部分。民航运营的飞机型号通常产品寿命周期长、产量大,在大批量生产情况下的成本投入可以通过批次长期逐步实现成本摊薄,因此在型号的全生命周期内核算生产成本较低。对于两栖飞机这种预期产量较少的科研型号,重点应该考虑如何实现目标成本控制的问题,大部件对接技术和方法的选择需要在产量和成本之间进行综合平衡。鉴于项目规划和基于MBD的全三维产品设计,减少工艺装备的投入、提高生产设备的使用率,寻求一种低成本、半自动化的大部件数字化测量技术和对接技术平台便成为可接受的合理选择。

“主制造商-供应商”制造模式下,为实现两栖飞机大部件半自动化的精确对接,大部件对接平台的设计需要完成大部件经过包装、长途运输后异地总装对接总体方案设计;半自动化柔性定位器的设计;大部件对接数字化虚拟仿真装配及路径优化、基于激光跟踪仪的辅助数字化测量规划、大部件对接质量评价标准等研究。

## 1 大部件对接总体方案设计

两栖飞机大部件对接主要指机头、中机身、后机身以及中央翼之间的对接,其大部件对接采用与自动化对接系统相同的调姿定位原理,每个部件均安装4个工艺接头用以支撑及定位,对应使用4个半自动柔性定位器对各部件进行调整定位,工艺接头与半自动柔性定位器之间采用罩杯式球面连接以实现各个工艺接头在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的移动和旋转。两栖飞机大部件对接流程如图3所示。

两栖飞机机身各段之间采用框上对接和框间对接结合的方式,即:由于其下部船体水密要求较严,故采用了框上对接形式;机身中上部采用框间对接的形式以便

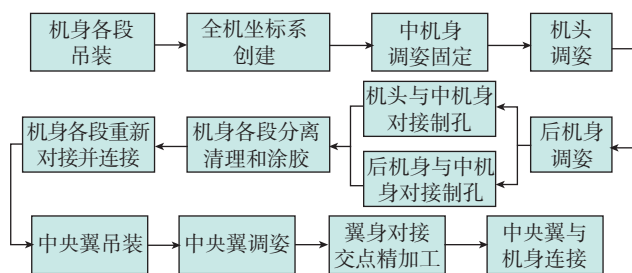


图3 大部件对接流程  
Fig.3 Flow of large components connection

工艺协调。对于自动化的对接方式来说,机身对接面采用上述两种分离形式的任何一种都没有操作困难。但对于两栖飞机来说,采用半自动柔性定位器时,在各部件连接孔制备后重新对接时很难实现大部件原路返回并保证所有标准件孔复位,即便可以实现也将耗费很长的时间。故对于两栖飞机大部件的对接,机头和后机身的半自动柔性定位器采用固定于精密对接车上的方式解决这一问题,其中中机身采用4个单独的半自动柔性定位器定位并固定,机头和后机身在离开中机身500mm左右的位置进行状态调整,最后前、后机身与中机身对接时,只用精密对接车在滑轨上沿顺、逆航向分别进行移动以实现大部件的对接功能,此时不必再次调整柔性定位器到准确位置,该方案大大降低了操作难度并保证了与自动化对接相当的对接精度,如图4所示。

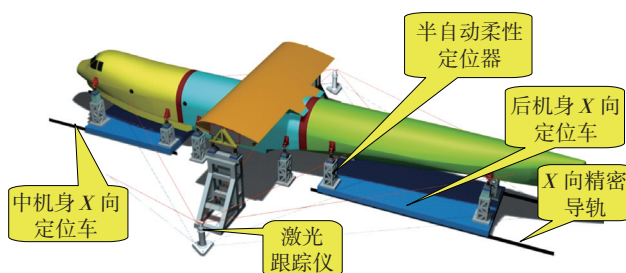


图4 大部件对接示意图  
Fig.4 Sketch map of large components connection

## 2 半自动柔性定位器设计

半自动柔性定位器是实现大部件对接的核心工装,每个半自动柔性定位器需要实现 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向及对应方向的旋转坐标的调姿和锁紧;同时为避免大部件调姿过程中单个工艺接头的应力过度集中和定位器卡死问题,需按“三、二、一”的原则对每个大部件所需的定位器的可调坐标和受力极限进行约束。全自动化的对接系统配备有先进的集成控制系统和压力传感器以实现多个定位器的联动进而实现大部件平稳、精确和无应力对

接。两栖飞机所采用的是半自动化柔性定位器,取消了集成控制系统及各种电机等高成本组件,保留压力传感器等关键组件,机身上设置相应的测量点,以地面预先设置的基点为基准建立坐标系,在激光跟踪仪的辅助监测下进行部件的姿态调整,采用人工操作的方式实现与自动化对接系统相当的对接精度,空客 A400M 的静力试验机便采用了此种低成本的对接方案并取得了很好的效果。两栖飞机大部件对接工作原理及半自动柔性定位器结构分别如图 5、图 6 所示。

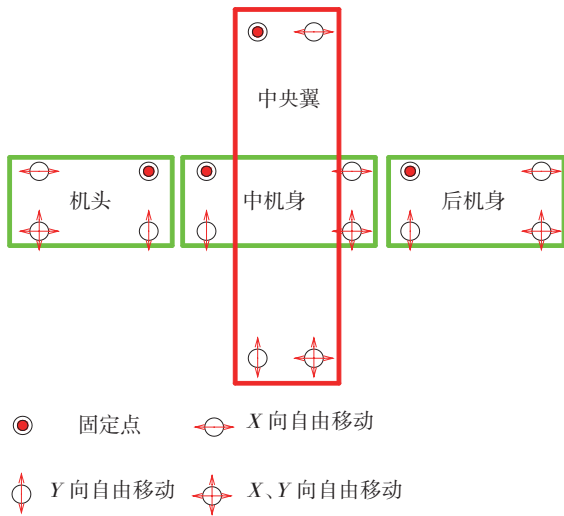


图5 柔性定位器工作原理

Fig.5 Working principle of flexible locator

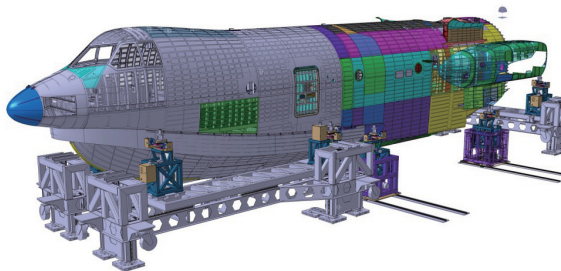


图6 半自动柔性定位器结构

Fig.6 Structure of semiautomatic flexible locator

### 3 大部件对接数字化虚拟仿真及装配工艺优化

飞机大部件之间的对接一般有诸如蒙皮对接面、长桁、框、龙骨梁以及交点接头等多种结构需要协调,同时各部件对接时还需要考核对接工装的合理性和可操作性以及装配工艺设计等的可操作性。传统“试错”的高强度、低效率的手工作业是目前存在的主要问题,飞机对接过程协调问题有很多需要在现场实际生产时才能发现,造成大量人力物力的浪费,严重拖延研制周期。近几年以波音 787 为代表的新一代飞机全面采用

了数字化设计和虚拟装配技术,在三维数字化产品设计的基础上,借助专业仿真软件在计算机虚拟环境下进行飞机部件装配过程的可视化仿真,提前发现产品设计、工艺规划以及工装设计的缺陷,特别是严重的设计错误问题,提前发现问题、解决问题大幅度提高了研制效率。目前,国内也在新研飞机的局部进行了应用,取得了非常好的效果。

两栖飞机全面采用了基于 MBD 技术的全三维数字化设计,给制造部门采用数字化虚拟仿真技术提供了必要条件。为减少两栖飞机大部件对接过程中的协调问题,项目采用基于 DELMIA 的全三维数字化仿真技术进行大部件对接装配过程的虚拟仿真,验证产品、工装及装配工艺的可行性和合理性,将发现的问题在设计过程中,避免颠覆性更改,大幅度减少实际生产现场的协调问题,如图 7 所示。

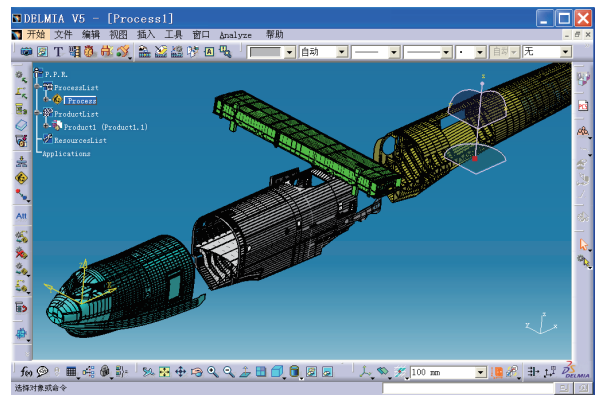


图7 大部件对接虚拟仿真

Fig.7 Virtual simulation of large components connection

### 4 基于激光跟踪仪的数字化测量规划

要实现两栖飞机大部件精确对接,测量技术是其中的关键环节。大部件对接测量需要解决各类测量点的规划设计。一是各类测量点的结构设计,如地标点、部件上的定位测量点、工装上的 ERS 测量点等;二是各类测量点的布局设计,即上述测量点在地面、机身以及工装上的分布等;最后是测量设备的选定和配置。

激光跟踪仪是目前大空间测量精度最高的测量设备,在小于 50m 的测量范围内,坐标重复测量精度达到  $5 \mu\text{m/m}$ ,绝对坐标测量精度达到  $10 \mu\text{m/m}^{[2]}$ 。在飞机部件对接中都有非常成熟和成功的应用。基于两栖飞机结构特点并结合大部件对接总体方案,拟采用 2 台分布在机身两侧的激光跟踪仪进行大部件对接时的跟踪辅助测量,测量数据以两栖飞机三维数字模型为原始基准,在各大部件上分别安装多个测量点,以地标点为基准建立两台激光跟踪仪的公共测量坐标系作为部件定

位坐标系,激光跟踪仪捕捉大部件上预置测量点的坐标值,与机体供应商在大部件装配型架内采集的坐标值进行数据对比,通过半自动化柔性定位器对大部件进行姿态调整,最终实现大部件的精确对接<sup>[3]</sup>。测量布局规划如图8所示。

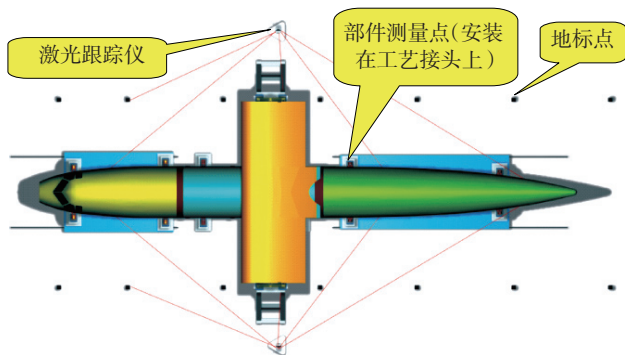


图8 大部件测量布局

Fig.8 Measurement layout of large components

## 5 大部件对接质量评价标准

飞机整机的姿态评价主要靠水平测量点进行评价,然而对于部件来说,仅靠水平测量点是远远不够的,而且在中机身等部件上没有设计水平测量点。因此,工艺测量点的设置便成为定位和大部件对接质量评价的重要依据。一般情况下,采用在部件上安装激光跟踪仪测量靶标点等措施代表整个部件的姿态和位置,理论上通过定位器进行大部件调姿时靶标点坐标值进入容差允许范围即可认为大部件调整到位。但是,由于飞机大部件本身结构的复杂性以及异地装配后经过吊装、长途运输等诸多环节,结构应力的变化和温差等因素导致的变形很难定量分析和控制,因此仅靠靶标点坐标值是无法全面评估大部件对接质量的,还需要针对部件上的关键要素进行综合考虑,这些要素主要包括:长桁对接面阶差、框距、蒙皮对缝大小及阶差、飞机龙骨梁对接面阶差以及部件本身所带的重要交点接头等位置,如翼身对接接头、起落架安装接头、尾翼与机身对接接头等。如果靶标点坐标值在容差允许范围内,但是以上关键要素偏差较大时,需要按以上要素的重要性进行权重分配,重新进行大部件的状态定位直至满足设计要求。

## 6 结束语

本文针对大型水陆两栖飞机本身的特点,介绍了一种采用低成本而且相对成熟的半自动化柔性定位器的大部件对接技术方案,方案基于全数字化产品设计、数字化虚拟预装配、激光跟踪仪辅助数字化测量技术,使用半自动柔性定位器进行大部件对接。数字化装配技

术必将成为未来影响新型飞机装配质量的一个重要因素,继续深入开展柔性定位技术的研究,提出的一些方法和技术对于产量较小的特种飞机有较强的参考意义和经济价值。

## 参考文献

- [1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):34-37.
- [2] 郭峰. 坐标测量技术在航空制造中的应用. 航空制造技术, 2013(19): 28-29.
- [3] 李光丽,侯志霞. 飞机大部件对接中的数字化测量技术研究 // 李恩强,刘华东. 第四届数字化柔性装配技术论坛论文集. 北京: 国防工业出版社, 2013:200-201.

(责编 深蓝)

(上接第75页)

团的减少造成的<sup>[3-4]</sup>。碳Ⅶ、M55JB 去除上浆剂后,极性分量下降也较为明显,这种降低也是由于酯基、环氧基、苯环等亲水性极性基团的减少造成的。对于 M40JB 发现去除上浆剂前后极性分量变化不大,可初步推断其上浆剂中含有的极性官能团比较少,这与红外结果分析的结果达到很好的一致。

## 3 结论

(1) 未去除上浆剂碳纤维(高强、高模、高强高模)表面能在  $37\sim 48\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  之间,从大到小依次为碳Ⅲ、M40、M55JB、M40JB 和碳Ⅶ;表面能主要以色散分量为,极性分量占的比例很小,占  $11\%\sim 25\%$ ;

(2) 去除上浆剂碳纤维(高强、高模、高强高模)表面能在  $37\sim 46\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  之间,从大到小依次为碳Ⅲ、M40、M55JB、碳Ⅶ和 M40JB。几种碳纤维极性分量在总表面能中所占的比例在  $10\%\sim 21\%$  之间;

(3) 去除上浆剂后极性分量下降较为明显,碳Ⅲ、碳Ⅶ、M40 和 M55JB 分别下降了  $56\%$ 、 $21\%$ 、 $18\%$  和  $16\%$ , M40JB 去除上浆剂前后极性分量变化不大。

## 参考文献

- [1] 朱黎黎,张佐光,李敏,等. 工艺温度下树脂与纤维的接触角及其粘附作用研究. 复合材料学报, 2010, 27(5):41-46.
- [2] 邓锐,李敏,张佐光,等. 接触角法测玄武岩及玻璃纤维表面能实验. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(11):1349-1352.
- [3] 袁海根,王汝敏,艾涛. 表面处理对 Kevlar 纤维复合材料界面结合强度的影响. 化学推进剂与高分子材料, 2005, 3(5): 38-41.
- [4] Nursel Dilsiz, Wightman J P. Effect of acid-base properties of unsized and sized carbon fibers on fiber/epoxy matrix adhesion. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2000, 164(2-3):325-336.

(责编 杰一)